# Bemessung und Qualitätssicherung von rigid inclusions mit Pressiometerversuchen und leichten Probebelastungen für ein Logistikzentrum in Kopenhagen

Christopher Tinat, MENARD GmbH

Säulen mit hoher Steifigkeit und einer signifikanten Eigenfestigkeit werden international als rigid inclusions bezeichnet. In Deutschland behandelt der Arbeitskreis 2.8 der DGGT diese Gründungssysteme unter dem Begriff Stabilisierungssäulen (STS) und erarbeitet Empfehlungen zur Bemessung und Ausführung. Im vorliegenden Arbeitsentwurf des Eurocode 7 Teil 3 werden Stabilisierungssäulen der Gruppe BII zugeordnet, d.h. der Klasse "Discrete Ground Improvement with rigid inclusions" zugewiesen. Bei der Bemessung des Gesamtsystems ist zu beachten, dass Interaktionsmechanismen zwischen Säulen, Lastverteilungsschicht (LVS) und der aufgelagerten Konstruktion eintreten. Die aufgelagerte Konstruktion, die LVS, die Säulen und der Boden zwischen den Säulen interagieren und bilden das zu bemessene Gesamtsystem. Im vorliegenden Beitrag wird am Beispiel eines Logistikzentrums in der Nähe von Kopenhagen die Bemessung von Nassmörtelsäulen nach dem CMC-Verfahren unter Berücksichtigung des Gesamtsystems und der Interaktionsmechanismen basierend auf international bewährten Ansätzen vorgestellt. Für das großflächige Säulenraster unter der Bodenplatte wird das System am Modell einer Einheitszelle berechnet. Die Interaktion zwischen den Säulen und dem Boden wird anhand der mobilisierten Scherspannung am Säulenmantel beschrieben, welche aus der Relativverschiebung zwischen Säule und Boden in der jeweiligen Tiefe resultiert. Die Verschiebung der Säule wird nach den französischen ASIRI-Empfehlungen anhand der Mobilisierungskurven nach FRANK/ZHAO (1982) basierend auf den örtlich durchgeführten Pressiometerparametern ermittelt und anhand von statischen Probebelastungen mit dem Trägergerät verifiziert sowie kalibriert.

# 1 Einleitung

Das Praxisbeispiel des Logistikzentrums nahe Kopenhagen stellt ein typisches Anwendungsgebiet von Säulen System CMC dar. Während solche Gründungssysteme in Deutschland bereits Stand der Technik sind, handelt es sich um das erste *rigid inclusion* Projekt für eine Lagerhalle in Dänemark. Entsprechend wurde die Bemessung basierend auf den international anerkannten ASIRI-Empfehlungen (IREX, 2012) durchgeführt.

Die setzungsempfindlichen Strukturen der Logistikhalle, wie die mit geringem Stahlgehalt faserbewehrte Bodenplatte und die hochbelasteten Einzelfundamente, erfordern Sondergründungsmaßnahmen zur Einhaltung der Gebrauchstauglichkeitsanforderungen auf dem kompressiblen Baugrund. Zur wirtschaftlichen Optimierung der Bodenplatte (Dicke und Bewehrung) wird eine Lastverteilungsschicht (LVS) oberhalb der Säulen bemessen und hinsichtlich Mächtigkeit und Widerstand gegen lokale Bruchzustände auf das Gesamtsystem ausgerichtet. Ziel der LVS ist es, die unbewehrten Säulen vom Bauwerk zu entkoppeln und die Bemessung der aufgelagerten Konstruktion mit dem Ansatz einer weitestgehend gleichmäßig flächigen Bettung auf der LVS zu ermöglichen. Dabei ist die Interaktion zwischen Säulen, LVS und Stahlbetonplatte zu berücksichtigen, welche zusätzliche Beanspruchungen in der LVS und in der Bodenplatte hervorruft, die bei der Auslegung der Bodenplatte zu berücksichtigen sind.

# 2 Projektvorstellung

Das Bauprojekt des neuen Vertriebszentrums Solrød ist eines der größten Logistikprojekte der letzten Jahrzehnte in Dänemark. Der Projektstandort befindet sich in der Nähe von Solrød Strand in der Bucht von Køge westlich der Autobahn E20, eine Hauptverkehrsachsen nach Kopenhagen.

Das Gesamtprojekt umfasst eine bebaute Fläche von ca. 380.000 m<sup>2</sup>, die in sechs Abschnitten (*Units*) mit mehreren Lagergebäuden und Logistikzentren unterteilt ist (Abbildung 1).



Abbildung 1: Gesamtprojekt Logistikpark Solrød mit 380.000 m<sup>2</sup> Hallenfläche auf 6 Units

Insbesondere im Bereich der Unit 1 im Süden des Areals wurden mächtige anthropogene Aufschüttungen und kompressible Schluffe bei der Erkundung angetroffen. Die würden bei einer direkten Flachgründung des Gebäudes ohne Bodenverbesserung zu inakzeptablen Setzungen und Verformungen von bis zu 7 cm führen. Die anderen Units konnten nach einem Bodenaustausch flach gegründet werden.

In Dänemark wurden bis dato keine *rigid inclusion* Gründungen geplant oder ausgeführt. Daher ist der Bauherr zunächst von einer konventionellen Pfahlgründung der Bodenplatte und der Einzelfundamente ausgegangen.

Da die geplante Pfahlgründung zu einer hochbewehrten und bis zu 40 cm mächtigen Bodenplatte geführt hätte, wurde das für Dänemark erste Konzept einer CMC-Gründung in Kombination mit einer LVS nach den ASIRI-Empfehlungen (IREX, 2012) ausgearbeitet. Neben den wirtschaftlichen Vorteilen konnten dadurch die in Dänemark strengen Nachhaltigkeits-Anforderungen nach DGNB-Standard durch Einsparung von Beton und Stahl insbesondere in der Bodenplatte eingehalten werden.

# 2.1 Ergebnisse Vorerkundung

Das Projektareal wurde im Zuge des Planungsprozesses zur Auslegung der ursprünglich geplanten Pfahlgründung mittels Drucksondierungen (CPT) und direkten Bohrungen aufgeschlossen. Für die Unit 1 wurden Pfahllängen von bis zu 15 m Länge in der Ursprungsplanung ermittelt.

Da die Baugrundbedingungen lokal stark schwanken und zur Bemessung der Säulengründung die bodenmechanischen Eigenschaften der kompressiblen Schichten von maßgebender Bedeutung sind, wurden ergänzend Pressiometerversuche nach Ménard gemäß DIN EN ISO 22476-4 für die Bemessung der CMC-Gründung ausgeführt.

# 2.1.1 Einführung zur Pressiometrie

Der Pressiometerversuch nach Ménard (PMT) ist ein in situ Belastungsversuch zur Bestimmung des Spannungs-Verformungsverhaltens des Bodens und gilt als Weiterentwicklung des konventionellen Bohrlochaufweitungsversuches mit Seitendruckgerät. Es wird auf eine Bohrlochwandung eine stufenweise gesteigerte Druckspannung mittels Gummimembran aufgebracht. Die dabei erzeugte Deformation wird gemessen, indem das Volumen der in die Messzelle nachlaufenden Flüssigkeit an der Messeinheit abgelesen wird.



Abbildung 2: Prinzipskizze der Pressiometrie

Die Messzelle befindet sich zwischen zwei Schutzzellen, welche ebenfalls mit Druck beaufschlagt werden. Hierdurch werden Randverformungen aus der Messzelle infolge einer Lastausbreitung ausgeschlossen, womit das Verformungsverhalten des Bodens an einem radialsymmetrischen, unendlich ausgedehnten zylindrischen System beschrieben werden kann. Der Druck auf die Messzelle wird durch auf die inkompressible Flüssigkeit drückende Pressluft erzeugt. Der Versuchsaufbau und wesentliche Bestandteile der Pressiometerapparatur werden in Abbildung 2 schematisch dargestellt.

# 2.1.2 Ergebnisse der Pressiometrie

Die zehn Ansatzpunkte der Pressiometrie wurden über die Hallengrundfläche der Unit 1 verteilt. Die Messungen erfolgten in einem Tiefenintervall von ca. 1,5 m, damit ein Steifigkeits- und Festigkeitsprofil über die Tiefe ausgewertet werden konnte. Im Rahmen des vorliegenden Beitrags werden exemplarisch die folgenden drei Bemessungspunkte behandelt, welche die Variation des Baugrunds und der Säulenlänge widerspiegeln:

Tab. 1: Angaben zu den in diesem Beitrag vorgestellten Bemessungspunkten

CMC- Nr.	OK AE (DVR90)	Progn. UK CMC (DVR90)	Gepl. Länge CMC (m)	lst Länge CMC (m)
1645	+4,8	-8,5	13,3	13,6
2214	+4,8	-7,5	12,3	12,2
2791	+4,8	-4,5	9,3	9,3

DVR90 = Referenzhöhe DK (Dansk Vertikal Reference)

Die geplante Länge bzw. Absetztiefe der CMC (DVR90) wurde an den Ergebnissen der CPT sowie PMT festgelegt und im Zuge der Herstellung durch die Aufzeichnung der Bohrparameter überprüft. Die CMC sollten ca. 50 cm in die mitteldicht gelagerten Sande bei einem  $p_{LM} > 2 \text{ MN/m}^2$  abgesetzt werden, um eine ausreichende Steifigkeit der CMC zu erreichen. An den drei Messpunkten wurden folgende Pressiometerparameter vor Ausführung der CMC gemessen:



Abbildung 3: Ergebnisse der Pressiometrie an den geplanten Säulenansatzpunkten 1645, 2214 und 2791

# 2.2 Ausführung der CMC

Das CMC-Verfahren ist eine Methode zur Herstellung von *rigid inclusions*. CMC sind vollverdrängende, unbewehrte Betonsäulen mit einem Durchmesser von 28 bis 60 cm. Im vorgestellten Projekt konnte ein vergleichsweise kleiner Durchmesser von  $D_{CMC} = 28$  cm bei einem Regelraster von ca. 8 m² je Säule ausgeführt werden, um die Setzungsanforderungen einzuhalten. Insgesamt wurden rd. 3.000 CMC auf einer Teilfläche von 20.000 m² inkl. der Einzelfundamente niedergebracht.

Der Vollverdrängungsbohrer wird rotierend mit großem Drehmoment in den zu verbessernden Boden abgeteuft, siehe Abbildung 4.



Abbildung 4: Herstellung der CMC im Raster und Fundamentaushub im frischen Zustand

Der tragfähige Horizont wird anhand der Aufzeichnungsparameter während des Absenkens detektiert und mit den Ergebnissen der Vorerkundung und geplanten Absetztiefen validiert. Mit der rasterförmigen Anordnung der CMC wird der Baugrund durch die Aufzeichnung der Bohrparameter engmaschig in Ergänzung zu den vorliegenden Erkundungen indirekt aufgeschlossen. Damit kann auf geologische Schwankungen während der Herstellung reagiert und die Säulenlänge entsprechend angepasst werden. Nach dem Erreichen der erforderlichen Tiefe erfolgt die Injektion des Betons im Kontraktorverfahren mit einem an den umgebenden Boden angepassten Druck.

# 3 Tragverhalten von rigid inclusions

# 3.1 Allgemeines

Die Bodenplatte, die Lastverteilungsschicht (LVS), die Säulen und der Boden zwischen den Säulen interagieren und bilden ein Gesamtsystem. Die auf die Bodenplatte einwirkenden Punkt- oder Flächenlasten werden über die LVS in die Säulen und auf den zwischen den Säulen befindlichen Boden übertragen. Die bewehrte Betonplatte oberhalb der LVS stellt eine starre Lasteinleitung dar. D.h., die Verformungen der Bodenplatte sind gleichmäßig und es treten nahezu keine Differenzsetzungen an der Oberkante der LVS auf. Aufgrund der behinderten Verformungen treten Spannungsdifferenzen auf. Die Spannungen in der Bodenplatte ergeben sich in Abhängigkeit der Bettungssteifigkeiten. Entsprechend kommt es aufgrund der höheren Steifigkeit der Säulen zu einer Spannungskonzentration an den Säulenköpfen. Restspannungen werden über den Boden zwischen den Säulen eingeleitet. Durch die Kompression des Bodens zwischen den Säulen, werden die Säulen im oberen Bereich zusätzlich durch negative Mantelreibung beansprucht, bis zur neutralen Ebene, unterhalt derer die Verformungen des Bodens die Verschiebung der Säule unterschreiten und eine positive Mantelreibung eintritt. Die Lasten eines kombinierten Säulensystems werden über positive Mantelreibung unterhalb der neutralen Ebene und Fußwiderstand am Säulenfuß in den Baugrund eingeleitet (siehe Abbildung 5).



Abbildung 5: Prinzip der Lasteinleitung von einer Betonplatte (starre Lasteinleitung) in Stabilisierungssäulen (TINAT ET AL., 2021)

#### 3.2 Lasttransfermechanismus

Wenn Pressiometerparameter vorliegen, wird international in der Regel auf die Methode nach GLANDY/FROSSARD (2002) zurückgegriffen, welche auch in den ASIRI-Empfehlungen enthalten ist. Die Einheitszelle wird hierbei in die zwei Berechnungsmodelle Säule und Boden eingeteilt. Der Lastanteil auf den Säulen und auf dem Boden wird iterativ verändert, bis die Setzungen der beiden Berechnungsmodelle (Säule und Boden) übereinstimmen, d.h. die Bedingung einer gleichmäßigen Setzung bei starrer Lasteinleitung erfüllt ist. Die Interaktion zwischen den Säulen und dem Boden wird anhand der mobilisierten Scherspannung am Säulenmantel beschrieben, welche aus der Relativverschiebung zwischen Säule und Boden in der jeweiligen Tiefe resultiert. Die Verschiebung der Säule wird dabei anhand der Lasttransferkurven nach FRANK/ZHAO (1982) basierend auf Pressiometerparametern ermittelt.

Das ebenfalls iterative Verfahren nach BOHN/VOGT (2018) basiert auf den gleichen Grundannahmen zur Lastverteilung. Das Widerstand-Setzungsverhalten der Säulen wird aus Feldversuchen empirisch abgeleiteten Kubikwurzel- oder Hyperbelfunktionen beschrieben. Weitere Möglichkeiten zur Ermittlung der Spannungsverteilung zwischen Säule und Boden werden umfangreich in SPIRKL/NEIDHARDT (2022) vorgestellt und verglichen.

Zudem stellen Finite-Elemente-Berechnungen eine Methode zur Berechnung der Lastaufteilung dar. Mit unkalibrierten FE-Modellen kann es jedoch zu einer Unterschätzung der Steifigkeit und der äußeren Tragfähigkeit von Säulen kommen, die mit dem Vollverdrängerverfahren hergestellt werden. Grund hierfür ist, dass der Herstellungsprozess und die damit einhergehenden Veränderungen der Bodenzustandsgrößen am Säulenmantel häufig keine hinreichende Berücksichtigung finden und die Kontaktformulierung zu konservativ ist. In TINAT ET AL. (2019b) sowie RACINAIS ET AL. (2017) wird daher für Vollverdrängungssäulen eine Kalibrierung des Modells mittels Pressiometerversuchen vorgeschlagen.

#### 4 Tragverhalten der Einzelsäule

#### 4.1 Berechnungsmethode basierend auf der PMT

Die Lasttransfermethode von FRANK/ZHAO (1982) basiert auf Pressiometerparametern. Die Berechnung erfolgt unter Berücksichtigung des Säulendurchmessers D<sub>c</sub> und der Bodenart. Die Berechnungsmethodik ist heute zur Bestimmung des Last-Setzungsverhaltens sowohl von Pfählen in der französischen Norm NF P94-262 als auch für rigid inclusions in den ASIRI-Empfehlungen (IREX, 2012) verankert. Die Lasttransfermethode gilt als äußerst zuverlässig und weist den Vorteil auf, dass sie auf realen Deformationsparametern des Bodens unter in situ Bedingungen basiert. Die Grenzwerte für den Mantelwiderstand q<sub>s,k</sub> und den Fußwiderstand q<sub>b,k</sub> können nach EC7-2 Anhang E.3 oder der französischen Norm NF P94-262 aus Pressiometerparametern abgeleitet werden.

Die Mobilisierungskurven von Mantelreibung und Spitzendruck werden nach der Modellvorstellung gemäß Abbildung 6 in Abhängigkeit des Ménard-Moduls nach GI. 1 und 2 ermittelt.

$$K_{q} = m_{q} \cdot E_{M} / D_{C}$$
 (1)

$$K_{\tau} = m_{\tau} \cdot E_{M} / D_{C}$$
 (2)



Abbildung 6: Mobilisierungskurven nach FRANK/ZHAO (1982)

Die Werte für die Steifigkeitskoeffizienten  $m_q$  und  $m_\tau$  sind abhängig von der Bodenart. Für grobkörnige Böden gilt  $m_q = 4,8$  und  $m_\tau = 0,8$ . Bei feinkörnigen Böden wird  $m_q = 11,0$  und  $m_\tau = 2,0$  angesetzt.

Die Ausgleichsfunktion der trilinearen Mobilisierungskurven kann nach COMBARIEU (1988) gemäß den ASIRI-Empfehlungen aufgestellt werden.

Für die im Projekt Solrød geplanten CMC konnten mithilfe der Pressiometrie die Widerstands-Setzungslinien in Abbildung 7 im Vorfeld der Ausführung prognostiziert werden. Die Grenzwerte für Mantelreibung und Spitzendruck wurden dabei nach EC7-2 Anhang E.3 basierend auf den pLM-Werten des Pressiometers angesetzt.



Abbildung 7: Berechnete Widerstands-Setzungslinien der Einzel-CMC 1645, 2144 und 2791

Wird das System ohne LVS ausgeführt, können die berechneten Kurven als Federsteifigkeiten der Auflagerpunkte für die Bodenplatte verwendet werden. Durch die Ausführung von mehreren, über die Fläche verteilten Ansatzpunkte können Streubreiten für Sensitivitätsanalysen ermittelt werden.

#### 4.2 Validierung des Modells mit leichten Probebelastungen

Mit der Lasttransfermethode ergeben sich theoretische Widerstands-Setzungslinien, die erfahrungsgemäß sehr gut mit dem tatsächlichen Tragverhalten aus Probebelastungsergebnissen übereinstimmen. Dies bestätigen die Vergleichsstudien von TINAT ET AL. (2019) und RACINAIS et al. (2017).

Zur Validierung des Widerstands-Setzungsverhaltens der Einzelsäule wurden im Projekt Solrød zehn leichte Probebelastungen bis 400 kN Last am Säulenkopf in maßgebenden Bereichen ausgeführt. Dadurch konnten die aus der PMT berechneten Säulensteifigkeiten validiert und bei Bedarf kalibriert werden.

Die Probebelastungen wurden mit dem eigenen Bohrgerät als Widerlager durchgeführt. Dazu wurde das Trägergerät mit seiner Quertraverse mittig über die Probesäule gefahren. Zwischen Quertraverse des Bohrgerätes und der CMC wurde ein Hydraulikzylinder zwischengeschaltet.

Die Messeinrichtung zur Verformungsmessung ist ein klassischer Benkelmann-Balken. Die Lastplatte wird auf den CMC-Kopf aufgesetzt. Die Last wird durch den Hydraulikzylinder stufenweise erhöht und mittels zwischengeschalteter Kraftmessdose gemessen. Die Verschiebung der Säule am Säulenkopf wird mittels Benkelmann-Einrichtung abgelesen. Ein Foto des Probebelastungsaufbaus ist in nachfolgender Abbildung 8 dargestellt.



Abbildung 8: Leichte Probebelastung bis 400 kN mit CMC-Gerät als Widerlager



Abbildung 9: Vergleich der berechneten WSL und Probebelastung an CMC 2791

Bei ausreichender Übereinstimmung der berechneten Widerstandssetzungslinie (WSL) mit dem realen Setzungsverlauf der Probebelastung können die aus dem Pressiometer gewonnenen Grenzwerte für Mantelreibung q<sub>s,k</sub> und des Fußwiderstands q<sub>b,k</sub> bestätigt werden, siehe Abbildung 9. Im anderen Fall kann eine Anpassung der Grenzwerte zweckdienlich sein, um das Widerstands-Setzungsverhalten der Säulen in den weiterführenden Berechnungen zutreffend abzubilden.

#### 5 Berechnung des Gesamtsystems

#### 5.1 Allgemeines

Der bestätigte oder nach einer Kalibrierung an einer Einzelsäule gewonnene Datensatz von  $q_{s,k}$  und  $q_{b,k}$ je Bodenschicht kann in die weiterführenden Berechnungen des Gesamtsystems übernommen werden, um alle maßgebenden Verformungsberechnungen und die Ermittlung der Biegemomente in der Bodenplatte durchzuführen.

Es sei darauf hingewiesen, dass eine zu geringe Säulensteifigkeit hinsichtlich Verformungsanalysen zu Ergebnissen auf der sicheren Seite, aber hinsichtlich der Biegemomente und Zugspannungen in der Bodenplatte zu Schlussfolgerungen auf der unsicheren Seite führt. Aus diesem Grund ist bei sensitiven Platten (z.B. schwach faserbewehrten Platten) eine Kalibrierung mit Probebelastungen zur Qualitätssicherung empfehlenswert.

# 5.2 Lastaufteilung

Das Gesamtsystem aus Bodenplatte, LVS und Säulen wird unter Berücksichtigung der Lastaufteilung und der negativen Mantelreibung berechnet, siehe Abbildung 10.



Abbildung 10: Vergleich Tragverhalten Einzelsäule und Gesamtsystem

Die maximale negative Mantelreibung wird gemäß ASIRI-Empfehlungen mit GI. 3 berechnet. Diese entspricht der Grenzbedingung des Coulomb'schen Schergesetzes für Kontaktreibung.

$$\tau_{s-,max} = Ktan\delta$$
 (3)

mit K = Erddruckbeiwert;  $\delta$  = Kontaktreibungswinkel

Tab. 2: Erfahrungswerte für Ktanδ nach NF P94-262 für Vollverdränger

Bodenart	Konsistenz/ Lagerung	Ktanδ (-)
Torf		0,2
Ton/Schluff	weich	0,2
	steif	0,3
Sand/Kies	locker	0,45
	dicht	1

Für die auf der Bodenplatte der Unit 1 unter den Regalflächen anzusetzende Flächenlast von p =50 kN/m<sup>2</sup> und dem Eigengewicht der Platte von g =5 kN/m<sup>2</sup> ergibt sich die in Abbildung 11 dargestellte Lastaufteilung für das Bodenprofil bei CMC Nr. 2791. Unterhalb der neutralen Ebene wurden die Mobilisierungskurven nach FRANK/ZHAO (1982) als Aktivierungsfunktion verwendet.



Abbildung 11: Ergebnisse der Lasttransfermethode für die Einheitszelle des Gesamtsystems

Es ist zu erkennen, dass die neutrale Ebene bei ca. 7,6 m unterhalb der Bodenplatte liegt. Oberhalb wirkt negative Mantelreibung und die Last in der Säule nimmt entsprechend zu. In der neutralen Ebene wird die maximale Last der Säule von 200 kN erreicht. Dies entspricht ca. 45 % der auf der Einheitszelle zugeordneten Flächenlast von 55 kN/m<sup>2</sup> (= 447 kN).

Aus den Ergebnissen kann die für den Nachweis der inneren Tragfähigkeit maßgebende maximale Last der Säulen entnommen werden. Ein Nachweis der äußeren Tragfähigkeit der Einzelsäule ist nicht erforderlich, da die Standsicherheit des Gesamtsystems (auch ohne Säulen) gegeben ist.

Die Berechnungen ergeben ein Setzungsmaß der Bodenplatte von 20 mm, womit die Setzungsanforderung von 2,5 cm eingehalten wird. Durch eine Verengung des Rasters oder mittels größerer Säulendurchmesser kann der Lastanteil der Säulen vergrößert und die Setzungen weiter reduziert werden.

### 5.3 Bemessung der Lastverteilungsschicht

#### 5.3.1 Nachweis der Grenzspannung

Im Projekt Solrød wurde die LVS aus Betonrecycling (RC-Material) hergestellt. Die Höhe H<sub>LVS</sub> über den Säulen beträgt 80 cm. Der Reibungswinkel wurde mit  $\phi' = 37^{\circ}$  ermittelt.

Ansätze zur Beschreibung der Interaktion zwischen Säulenkopf und LVS im Grenzzustand der Tragfähigkeit basieren auf der klassischen Grundbruchtheorie. Gemäß Abbildung 12 wird in den ASIRI-Empfehlungen von einem Grundbruchmechanismus basierend auf PRANDTL (1920) ausgegangen, sofern auf der Lastverteilungsschicht ein nahezu starres Element wie eine Betonplatte gelagert ist. Die Grenzspannung beschreibt die maximal aufnehmbare Spannung am Säulenkopf. Diese ergibt sich unter Verwendung der in den ASIRI-Empfehlungen verwendeten Parametersymbolik nach Gleichung (4).

Die Berechnung erfolgt unter der Voraussetzung, dass sich die Höhe der theoretischen Bruchfigur

 $(H_{max})$  innerhalb der LVS vollständig ausbilden kann und  $H_{LVS} > H_{max}$  gilt. Für dünne Lastverteilungsschichten mit  $H_{LVS} < H_{max}$  tritt eine Erhöhung der zulässigen Grenzspannung ein. Die Ermittlung dieser Erhöhung wird in TINAT ET AL. (2021) vorgestellt.



Abbildung 12: Grenzzustand der LVS bei starrem Lasteintrag (Prandtl-Mechanismus)

$$q_{\rm p}^{\,+} = s_{\rm q} \cdot N_{\rm q} \cdot q_{\rm s}^{\,+} + s_{\rm c} \cdot N_{\rm c} \cdot c' + s_{\rm \gamma} \cdot N_{\rm \gamma} \cdot r_{\rm p} \cdot \gamma \qquad (4)$$

Bei den Parametern N<sub>q</sub>, N<sub>c</sub> und N<sub>Y</sub> handelt es sich um die Grundwerte der Tragfähigkeitsbeiwerte nach DIN 4017. s<sub>q</sub>, s<sub>c</sub>, und s<sub>Y</sub> stellen die ebenfalls aus der deutschen Normung bekannten Formbeiwerte dar. r<sub>p</sub> ist der Radius der kreisförmigen Lasteinleitungsfläche, hier der Säule.



Abbildung 13: Grenzspannungszonen bei  $D_{CMC} = 28 \text{ cm}$  und  $\varphi' = 37^{\circ} \text{ der LVS}$ 

In Abbildung 13 ist die Geometrie der potentiellen Bruchfigur mit den Grenzspannungszonen I-III nach RANKINE für die Säulen mit  $D_{CMC} = 28$  cm dargestellt. Die Höhe der berechneten Bruchfigur beträgt bei dem hier ermittelten Reibungswinkel der LVS H<sub>max</sub>  $\approx$ 0,6 m. Entsprechend gilt H<sub>LVS</sub> > H<sub>max</sub> und die zulässige Grenzspannung kann nach Gl. 3 berechnet werden.

In Abbildung 14 sind die Prandtl-Linie (Grenzspannungslinie) sowie die Lasterhaltungslinie dargestellt. Der Schnittpunkt beider linearen Funktionen ergibt die zulässige Grenzspannung bei einer Flächenlast von 55 kN/m<sup>2</sup>. Die aus der Lasttransfermethode ermittelten, mobilisierten Spannungen am Säulenkopf (q<sub>mob</sub>) sind hier kleiner und liegen damit im zulässigen Bereich. Wäre dies nicht der Fall, sind die geometrischen Randbedingungen des Systems (wie Raster oder Säulendurchmesser) zu modifizieren, die Qualität der LVS aufzuwerten (z.B. durch Bindemittel) oder es sind plastische Verformungen in der LVS in der Verformungsanalyse zu berücksichtigen.



Abbildung 14: Prandtl-Diagramm der LVS mit char. mobilisierter Spannung q<sub>mob</sub> an CMC 2791

#### 5.4 Einfluss auf die Bodenplatte

Zu berücksichtigen ist, dass eine gering mächtige LVS auch eine Erhöhung der Biegemomente in der Bodenplatte nach sich zieht. Mit der elastischen Plattentheorie und der Annahme einer Lastverteilung in der LVS wird eine Berechnung der Biegemomente durchgeführt. Das maximale Biegemoment tritt über dem Säulenkopf auf. Im Projekt Solrød wurde dies mit 5,5 kNm/m und daraus resultierenden zusätzlichen Zugspannungen in der Bodenplatte berücksichtigt. Der Fasergehalt wurde entsprechend angepasst. Durch diese Betrachtung des Gesamtsystems und eine iterative Abstimmung zwischen Ausführungsplanung der Säulen und Bodenplatte konnte die Dicke der Bodenplatte auf 18 cm optimiert werden.

#### 6 Zusammenfassung

Mit den über die Grundfläche des Gebäudes verteilten Pressiometerversuchen in der Vorerkundungsphase in Kombination mit baubegleitenden Probebelastungen an diesen Standorten lässt sich das Tragverhalten der Säulen über die gesamte Gründungsfläche des Bauwerks abbilden. Die Modellfunktionen zum Widerstands-Setzungsverhalten der Säulen wird in die erforderlichen Berechnungsschritte für das Gesamtsystem übernommen. Dies sind z.B. die Ermittlung der Lastaufteilung mit der maximalen Einwirkung auf die Säulen, der Nachweis der unbewehrten granularen Lastverteilungsschicht, die Setzung des Gesamtsystems und die zu beachtenden Biegemomente in der Bodenplatte. Das hier vorgestellte Bemessungsschema des Gesamtsystems nach ASIRI-Empfehlungen entspricht den Leitgedanken des erwarteten EC 7-3. Die Probebelastung bis zur Gebrauchslast von isolierten Säulen mittels Trägergerät stellt eine geeignete Methode zur Qualitätssicherung dar, um den im Entwurf des EC7-3 vorgeschlagenen Prüfaufwand von *rigid inclusions* gerecht zu werden, sofern der Belastungstest zur Sicherung der Gebrauchstauglichkeit dient.

#### Literaturverzeichnis

Bohn C.; Vogt N. (2018). *Lasttransfermethode zur Berechnung von Gründungen und Baugrundverbesserung mit starren Säulen* in: Bautechnik, H. 9, S. 597-606.

Combarieu, O. (2006). *L'utilisation des modules de déformation en géotechnique.* Revue Francaise de Géotechnique, Nr. 119.

Frank, R.; Zhao, S.-R. (1982). Estimation par les paramètres pressiometriques de l'enforcement sous charge axiale de pieux forés dans des sols fins in: Bulletin de liaison des LPC, Nr. 119, S. 17-24.

Glandy M.; Frossard A. (2002). *Justification d'une fondation superficielle sur un sol renforcé* in. Annales des l'IBTP, Nr. 1, S. 45-53.

Irex (2012). Recommendations for the design, construction and control of rigid inclusion ground improvements. ASIRI National Project.

Prandtl, L. (1920). Über die Härte plastischer Körper, Berlin, S. 74-85.

Racinais, J. et al. (2017). Beneficial Use of Pressuremeter Tests for Accurate Modelling by Finite Elements of a Rigid Inclusion Ground Improvement Solution. Proceedings of ICSMGE, Seoul, S. 2635-2638.

Spirkl, F.; Neidhart T. (2022). *Lastaufteilung in Last-verteilungsschichten über Stabilisierungssäulen.* 13. Kolloquium Bauen in Boden und Fels, TA Esslingen.

Tinat, C., Kirstein, J.; Grabe, J. (2021). Zur Tragfähigkeit von granularen Lastverteilungsschichten über Stabilisierungssäulen. Geotechnik, 44(2), 92-101.

Tinat, Ch.; Knoche, S.; Chaumeny, J.-L. (2019). *Die Ménard-Pressiometrie zur Ermittlung von Tragfähigkeit und Setzungsverhalten axial belasteter Tragelemente validiert an Probebelastungen.* Pfahl-Symposium 2019, Braunschweig, S.569-595.

Tinat, Ch.; Diedenhoven, L.; Chaumeny J.-L. (2019b). Anwendung einer Lasttransfermethode auf Basis der Ménard-Pressiometrie zur Bemessung von Vollverdrängungssäulen System CMC validiert an Probebelastungen. Darmstädter Geotechnik-Kolloquium, H. 105, Darmstadt, S. 4-17.